



УДК 536.2

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ ДЛЯ СКВОЗНОГО НАГРЕВА ТИТАНОВЫХ ЗАГОТОВОК БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

MODERNIZATION OF INDUCTION HEATER FOR PURPOSE OF THROUGH HEATING OF TITANIUM BLADES WITH LARGE DIAMETER

Смольянов Иван Александрович, магистрант каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: i.a.smolianv@urfu.ru, Тел.: +7(950)555-34-50

Тарасов Федор Евгеньевич, к.т.н., сотрудник каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: f.e.tarasov@urfu.ru. Тел.: +7(912)253-05-62

Фризен Василий Эдуардович д.т.н., доцент каф. «Электротехника и электротехнологические системы» первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: vfriзен@yandex.ru

Ivan A. Smolianov, Master student, Department «Electrical Engineering and Electrotechnology Systems», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: i.a.smolianv@urfu.ru. Ph.: +7(950)555-34-50

Fedor. E. Tarasov, PhD., worker of Department «Electrical Engineering and Electrotechnology Systems», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: f.e.tarasov@urfu.ru. Ph.: +7(912)253-05-, Doctor Sc., Prof., Department «Electrical Engineering and Electrotechnology Systems», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: vfriзен@yandex.ru.

Аннотация: Рассматриваются основные проблемы сквозного индукционного нагрева заготовок из титановых сплавов с большим диаметром. Сформулирована практическая задача, которую необходимо решить. Предложены способы решения. Предлагаются пути модернизации установки индукционного нагрева, расположенной на ПАО «ВСМПО-АВИСМА».

Abstract: The main problems of through induction heating of blanks from titanium alloys with a large diameter are considered. A practical problem is formulated that needs to be solved. Methods of solution are proposed. There are proposed ways to modernize the induction heating plant located at PJSC VSMPO-AVISMA.

Ключевые слова: сквозной индукционный нагрев, связанная задача, модернизация

Key words: through induction heating, coupled task, modernization.

ВВЕДЕНИЕ

Титановый сплав на сегодняшний день является одним из основных конструкционных материалов различных отраслей, таких как авиационная, автомобильная и космическая промышленность. Широкое их использование связано с присущим титану и его сплавам комплексу свойств – высокая удельная прочность, коррозионная стойкость во многих агрессивных средах, немагнитность, хорошая жаропрочность при температурах эксплуатации до 500-600 °С. [1]

Титановая продукция на мировом рынке на порядок выше прямых конкурентов. Экономическую конкуренцию может обеспечить эффективный технологический процесс обработки и производства данных сплавов. Основные этапы подготовки готового сплава лежат в следующем: фасонное литье, пластическая деформация, сварка, механическая и термическая обработка. Рассмотрения возможностей повышения на каждом этапе производства титановых сплавов весьма обширно и выходит за рамки данного тезиса. В данной работе рассматриваются возможности уменьшения производственного

цикла при термической обработке титанового слитка.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Индукционный нагреватель (Рис. 1) представляет собой двухслойную катушку, выполненную из медной трубки 20х16х2 (16 мм осевой размер). Каждый слой имеет 54 витка. Наружный слой имеет ряд отпаяк на витках. Внутренняя и внешняя катушка подключены во всех опытах последовательно. К полному индуктору параллельно подключены конденсаторные батареи. В процессе моделирования влияние конденсаторных батарей на частоту (резонансный контур) не учитывалось. В математической модели исходными параметрами для индуктора являлись падения напряжения и частота.

Индуктор во всем опытах включен со всеми отпайками.



Рис. 1. Индукционная установка

СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

На практике невозможно описать физические величины с помощью каких-либо эталонных величин. На практике любая заготовка любого материала имеет отклонения от стандартных свойств материалов, связано это со старением материала, пройденной переподготовке и степени нарушения кристаллической структуры. Поэтому при моделировании электротепловых процессов прибегают к допускам по свойствам материалов. В результатах приведенных в данном отчете отклонения от свойств материалов, выданных ВСМПО, не превышает $\pm 10\%$ (отклонения обозначены штриховыми линиями на рисунках). Основные параметры заготовки, используемые в работе приведены ниже. Диэлектрическая и магнитная проницаемость принята единице.

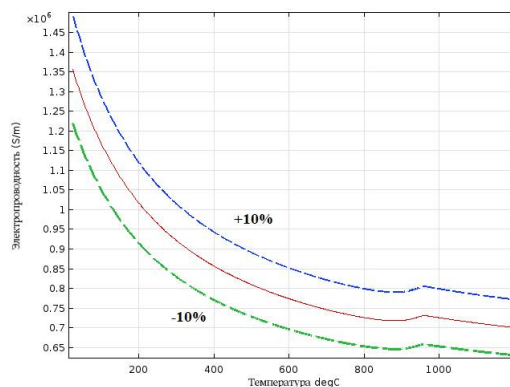


Рис. 2. Электропроводность титана

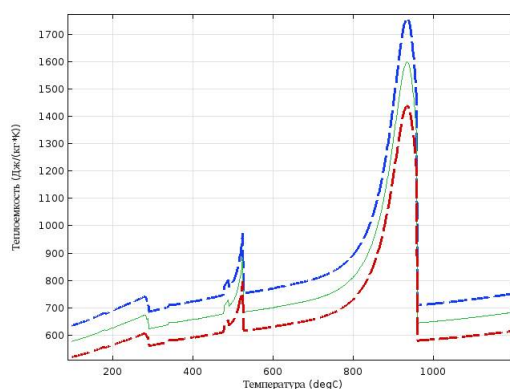


Рис.3. Теплоемкость

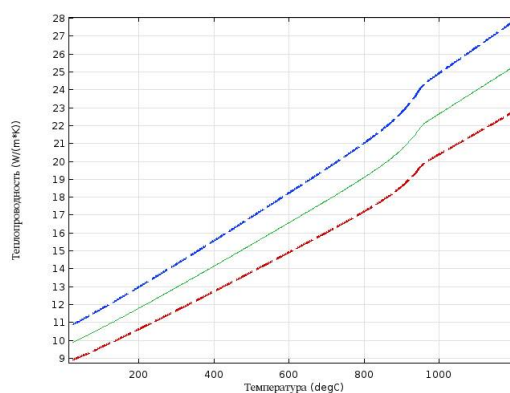


Рис.4. Теплопроводность

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основная сложность нагрева заготовки в данной установке индукционного нагрева на «ВСМПО-АВИСМА» является правильное подключение обмотки индуктора. Неправильное подключение отпаяк индуктора приводит к неравномерному нагреву по длине заготовки, как показано на Рис. 5. Связано это с короткой частью витков индуктора и некорректном распределении поля в заготовке (Рис. 6, 7). Такое подключение обмоток целесообразно использовать для меньшей длины заготовок. Данная работа рассматривала длину заготовки 700 мм. Согласно классической теории нагрева, выбирают длину индуктора на 20%

больше чем длина индуктора[2], [3]. Исходя из этих мыслей, принято решение проводить нагрев на индукторе полной длины (без закороток витков). Сквозной нагрев

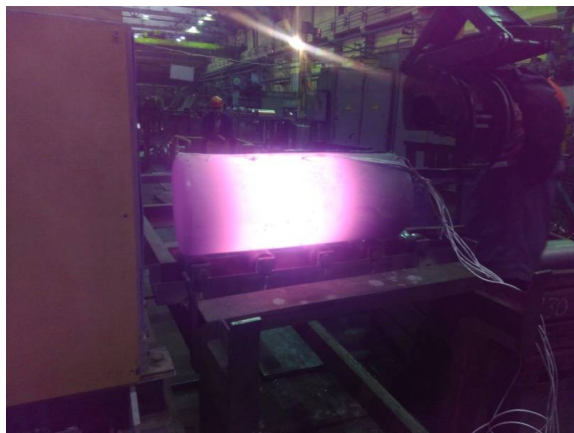


Рис. 5. Заготовка после нагрева при закороченных боковых витках

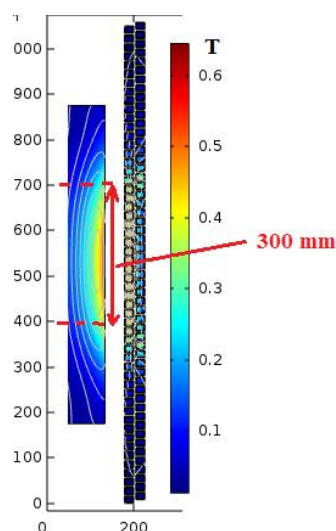


Рис. 6. Распределение магнитного поля при закороченных витках

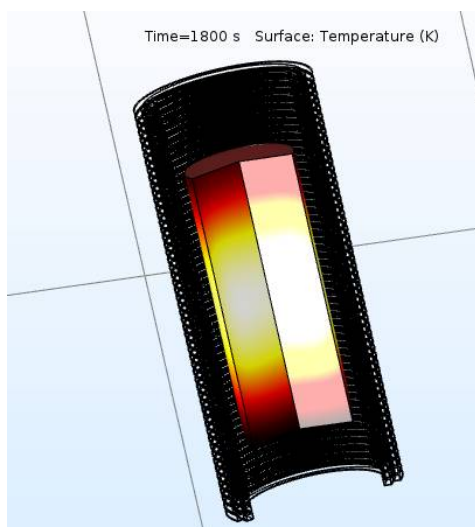


Рис. 7. Моделирование температурного поля в численном пакете

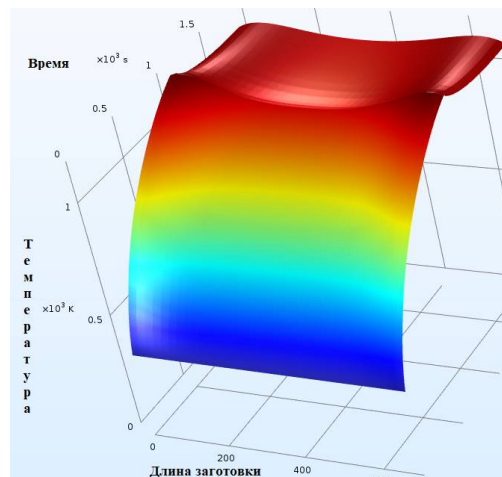


Рис. 8. Эффект, вспучивания поля на краях заготовки

В процессе экспериментов и численного моделирования было выявлено вспучивание магнитного поля на концах заготовки. Такой физический эффект приводит к перегреву краевых зон заготовки, как показано на Рис. 8. Авторами данной работы предлагается снизить влияние данного эффекта за счет добавления в крайние области балластные болванки из того же материала. Добавление балластных болванок позволит перенести вспучивание магнитного поля из заготовки в зону балластных заготовок.

Достижение равномерности по длине и глубине заготовки было достигнуто экспериментально с помощью регулирования мощности во время нагрева. Первый этап заключался в доведении заготовки до максимальной, требуемой температуры по техническому заданию. На втором этапе необходимо поддерживать заданную температуру в слое, в котором выделяется энергия (скин-слой), постоянной. Достигается это условия из физических соображений о тепловом балансе. Отток тепловой энергии из слоя выделенным красным цветом (Рис. 9) состоит из тепловых потерь с поверхности заготовки и теплового потока распространяющегося внутрь заготовки за счет теплопроводности. Необходимо закачивать такую мощность в заготовку, что она не будет превышать оттоки этих двух тепловых потоков, что позволит не перегревать заготовку, а также не меньше чем те же самые потоки, что позволит не охладить температуру в данном слое. Такой подход позволил выполнить техническое задание (Рис. 10)

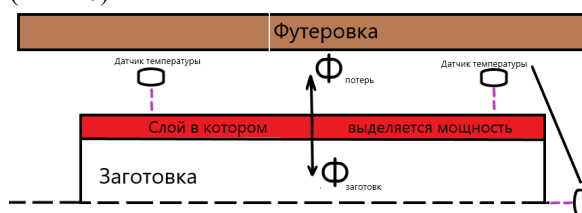


Рис. 9. Схематичное изображение индукционной заготовки

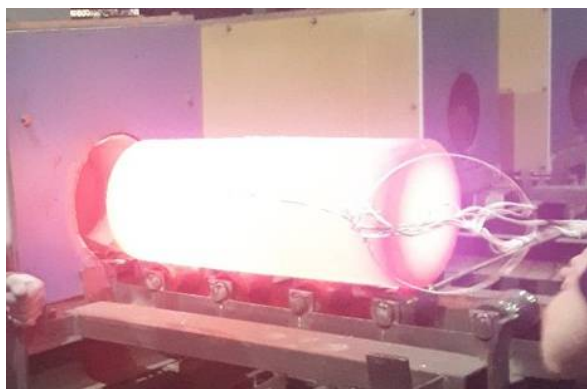


Рис. 10. Вычисленные значения температур

ВЕРИФИКАЦИЯ МОЕЛЕЙ

Верификация моделей проводилась при различных подключениях отпаяк индуктора, но для избегания перенасыщения работы графиками приводится сравнения экспериментальных данных и вычисленных результатов для одного случая, когда включен индуктор без разрывов. Ток, протекающий в катушках, равен примерно 3158 А на первом этапе и 1500 А на втором.

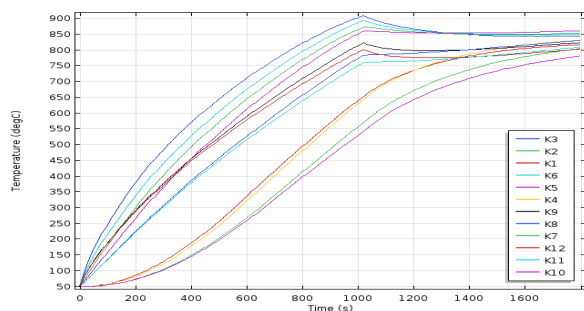


Рис. 11. Вычисленные значения температур

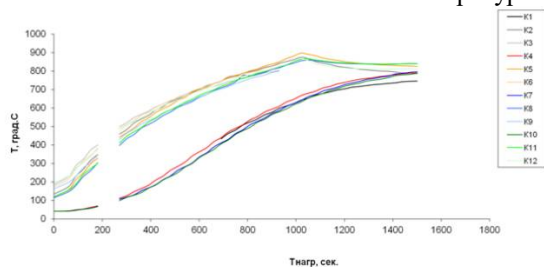


Рис. 12. Экспериментальные значения температур

Можно сделать заключение из сравнения результатов эксперимента и моделирования, что сходимость кривых в каждой точке приемлема для инженерной практики. Экспериментальные кривые имеют меньшую расходимость между точками с меньшей глубиной (так, скажем густота кривых). Но связано это в большинстве с тем, что разный масштаб графиков, и если детально

проанализировать, то экспериментальные кривые практически совпадают с математическими результатами. Также стоит учесть, возможность погрешность свойств материалов $\pm 10\%$. Данная погрешность не учитывалась в процессе моделирования. Стоит помнить о довольно большой погрешности измерения температур с помощью термопар. Главным выводом является, что была создана модель, которая повторяет характер кривых температур, качественно и количественно.

КПД установки в процессе повышается и лежит диапазоне от 35 до 42 %. Распределение подводимой мощности к загрузке меняется от времени. Связанно это с тем, что в процессе нагрева меняются электрические свойства (электропроводность из-за изменения температуры). Максимальная мощность резко снижается, в то время как, среднее значение увеличивается, но не так значительно. Данное явление можно в дальнейшем использовать для выравнивания температур по объему.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен подход по выбору мощности при сквозном нагреве заготовок большого диаметра и сильных нелинейных свойствах материала.

Проведена верификация численных моделей с помощью экспериментальных данных полученных на промышленном производстве ВСМПО-АВИСМА. Затрагиваются основные проблемы равномерного прогрева титановых сплавов по всему объему заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие / А.Г. Илларионов, А. А. Попов. - Екатеринбург.: Изд. Урал. ун-та. 2007. -137 с.
2. Структурное моделирование тепловых процессов в электротермических установках : учебное пособие / В.В. Гоман, С.М. Мезенин, В.А. Прахт, С.Ф. Сарапулов, Ф.Н. Сарапулов, С.А. Федорев; под общ. ред. Ф.Н. Сарапулова. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2009. – 343 с.
3. Электрические печи и установки индукционного нагрева. Фомин Н. И., Затуловский Л.М. М., «Металлургия», 1979, 247 с.